第 38 卷第 11 期
2018 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.11
Jun.,2018

DOI: 10.5846/stxb201706161097

朱倩,周之栋,施毅,吴永波,薛建辉.施用生物炭基肥对喀斯特石灰土磷元素特性的影响.生态学报,2018,38(11):4037-4044.

Zhu Q, Zhou Z D, Shi Y, Wu Y B, Xue J H.Effects of biochar-based fertilizer on phosphorus content of karst calcareous soil.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):4037-4044.

施用生物炭基肥对喀斯特石灰土磷元素特性的影响

朱 倩,周之栋,施 毅,吴永波,薛建辉*

南京林业大学生物与环境学院,南京林业大学江苏省南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要:以贵州省喀斯特山地石灰土为研究对象,采用盆栽试验方法,研究施用生物炭(稻壳炭)、猪粪堆肥和 NPK 肥 3 种肥料制成的生物炭基肥,测定土壤中不同形态磷含量、碱性磷酸酶活性及刺槐幼苗生物量。试验共设 10 个处理,分别为 CK、M、F、MF、RH1MF、RH2MF、RH4MF、RH8MF、RH4M、RH4F(其中 CK 代表对照,M 代表堆肥,F 代表化肥,RH 代表稻壳炭,数字代表生物炭按炭土质量比计算在生物炭基肥中的配比)。结果表明,施用生物炭基肥可显著提高喀斯特石灰土中总磷、有效磷、有机磷、微生物量磷含量及刺槐幼苗生物量,生物炭高施用量下处理(RH8MF)的效果更好,且 4 种不同形态的磷含量相互之间呈极显著正相关(P<0.01);生物炭中等用量配比下生物炭基肥处理(RH2MF、RH4MF)的土壤碱性磷酸酶活性最高,分别比 CK 提高 82.7%、63.4%。综上所述,施用生物炭基肥,尤其在生物炭较高施用量下,可以显著改善喀斯特石灰土中磷素含量,可改善石灰土中磷素含量较低状况,提高喀斯特山地人工幼林地生态恢复的成效。

关键词:石灰土;生物炭基肥;磷;碱性磷酸酶

Effects of biochar-based fertilizer on phosphorus content of karst calcareous soil

ZHU Qian, ZHOU Zhidong, SHI Yi, WU Yongbo, XUE Jianhui *

College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University; Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, *China*

Abstract: This study conducted a pot experiment using karst calcareous soil from Guizhou province, focusing on the effects of biochar-based fertilizer (made from rice-husk-derived biochar, pig manure compost, and NPK fertilizer) on the contents of various types of soil phosphorus, soil alkaline phosphatase activity, and biomass of black locust seedlings. Ten treatments were set up: CK, M, F, MF, RH1MF, RH2MF, RH4MF, RH8MF, RH4M, and RH4F (CK is control, M is compost, F is NPK fertilizer, RH is rice-husk-derived biochar and the number is the amount of biochar in the treatment based on the ratio of biochar to soil). Our results showed that the application of biochar-based fertilizer could significantly increase the contents of soil total phosphorus, available phosphorus, organic phosphorus, microbial biomass phosphorus, and seedling biomass, with the strongest effects with the highest biochar application rate (RH8MF). The above 4 different types of phosphorus showed highly significant positive correlations (P<0.01) with each other. The soil alkaline phosphatase activity was highest with the treatments with the medium biochar application rates (RH2MF and RH4MF), at 82.7% and 63.4% higher than CK respectively. In conclusion, biochar-based fertilizer application, especially at higher biochar addition rates, significantly increased phosphorus content of karst calcareous soil and improved the low-content status, so as to improve the effects of ecological restoration of young artificial woodlands in karst areas.

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502605);国家林业局“948”项目(2014-4-24);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAD07B0404);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

收稿日期:2017-06-16; **修订日期**:2017-12-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jhxue@ cnbg.net

Key Words: calcareous soil; biochar-based fertilizer; phosphorus; alkaline phosphatase

贵州省是世界上喀斯特地貌发育最完全的连续地带,喀斯特出露面积达 13 万 km^2,占全省土地面积的 73%[1],生态环境极为脆弱,石漠化和水土流失已成为该地区最主要的生态系统退化问题。有研究表明,喀斯特地区土壤侵蚀导致土壤氮磷等养分元素淋溶作用加快,并加速了土壤贫瘠化[2]。同时,喀斯特山地土壤为碱性石灰土,钙离子含量偏高,土壤中磷主要以难溶性磷酸钙盐形式存在[3-4],使土壤有效磷含量严重不足,成为土壤养分主要制约因子,并阻碍退化山地植被生长与恢复速度。因此,在人工幼林地中施肥可增加土壤养分供给,提高造林成活率和幼树生长量。目前,农田和林地施肥使用速效性化肥较多。化肥在较短时间内可迅速提高土壤中有效养分的含量,但长期施用可导致土壤质量退化,并降低土壤酶活性[5-6]。施用有机肥对提高土壤中有效养分含量具有持续性[5],并对土壤酶活性和养分的循环转化具有促进作用[7]。近年来,生物炭作为土壤改良剂和肥料缓释载体,被广泛应用到农林业土壤改良中。有研究表明,生物炭能够提高土壤有机质含量,改善土壤保水、保肥性能,减少氮磷养分损失,提高土壤有效磷含量[8-9],可提高土壤微生物活动性,特别是菌根真菌。有关生物炭施用于喀斯特石灰土中对磷元素的影响研究鲜见报道。

本文利用盆栽试验方法施用生物炭+猪粪堆肥+NPK 肥制成的生物炭基肥,探讨不同处理方式对喀斯特山地石灰土不同形态磷素含量和碱性磷酸酶活性的影响,并分析各指标之间的相关性,解释土壤磷素循环转化的机理,试图筛选出最适的施肥种类和施用量,为喀斯特山地幼林地恢复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与肥料

试验土壤取自贵州省普定县白岩镇的退耕还林地(105°27′—105°58′E, 26°9′—26°31′N)。普定县属于典型的喀斯特地区,该区土壤为典型石灰土,土层平均厚度 25 cm[10]。本次试验土壤采样深度为地表耕作层 0—20 cm 内,过 2 mm 筛消毒后备用,基本理化性质为:pH=7.72,容重 1.48 g/cm^3,有机质含量 14.44 g/kg,碱解氮 65.81 mg/kg,总磷 502.96 mg/kg,有效磷 5.40 mg/kg,有机磷 319.45 mg/kg,微生物量磷 1.37 mg/kg。

试验所用生物炭为稻壳炭,购于安徽拜尔福生物科技有限公司;生物有机肥为猪粪堆肥,购于上海时科生物科技有限公司;NPK 肥为尿素(N 含量 46.7%),磷酸一铵(N-P_2O_5-K_2O:12.2-61.7-0),氯化钾(K_2O 含量 63.2%)。生物炭基肥采用固液吸附法进行实验室自制,将 NPK 肥和堆肥溶于一定体积超纯水中,加入相应比例生物炭,充分搅拌混匀后平衡 24 h,置于 60 ℃ 烘箱烘干至恒重,制成生物炭基肥,封装于自封袋中保存备用。各肥料养分含量见表 1。

表 1 稻壳炭与猪粪堆肥理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of rice-husk-derived biochar and pig manure compost

稻壳炭 Rice-husk-derived biochar	pH	总磷 Total phosphorus /%	有效磷 Available phosphorus /(mg/kg)	有机磷 Organic phosphorus /(g/kg)	灰分 Ash contents /%	总碳 Total carbon /%	总氮 Total nitrogen /%	有效钾 Available potassium/ (g/kg)	比表面积 Specific surface area/ (m^2/g)
	9.41	0.13	21.31	0.52	13.5	46.3	0.6	2.54	91.45
猪粪堆肥 Compost	pH	总磷 Total phosphorus/ %	有效磷 Available phosphorus/ (g/kg)	有机磷 Organic phosphorus/ (g/kg)	有机质 Organic matter/%	总氮 Total nitrogen/%	总钾 Total potassium/%	总养分 Nutrient content (NPK)/%	
	8.5	4.28	3.57	26.46	82.3	1.71	0.86	6.85	

1.2 试验设计

试验地点位于南京林业大学下蜀林场,于 2016 年 4 月进行盆栽试验。盆栽植物为刺槐,种子购于南京,

经育苗处理长出幼苗后,选取生长旺盛且长势一致的幼苗移栽于高 18 cm、上径 15 cm、下径 12 cm 的花盆中,每盆装土 2 kg。实验共 10 个处理,分别为:(1)对照组,不添加任何处理 CK;(2)只施加堆肥处理,M;(3)只施加 NPK 肥处理,F;(4)施加堆肥和 NPK 肥处理,MF;(5)施加 1%稻壳炭(炭土质量比,下同)+堆肥+NPK 肥处理,RH1MF;(6)施加 2%稻壳炭+堆肥+NPK 肥处理,RH2MF;(7)施加 4%稻壳炭+堆肥+NPK 肥处理,RH4MF;(8)施加 8%稻壳炭+堆肥+NPK 肥处理,RH8MF;(9)施加 4%稻壳炭+堆肥处理,RH4M;(10)施加 4%稻壳炭+NPK 肥处理,RH4F;每个处理中 NPK 肥和堆肥保证等氮量施加,各处理施用肥料种类和数量列于表 2。每个处理 15 盆。装盆之前,各处理生物炭基肥与土壤进行充分掺混。于 2017 年 4 月采集盆栽土壤表土层多点混合土样,每个处理随机选取 3 个盆栽作为 3 个重复。

表 2　不同施肥处理中肥料种类和数量

Table 2　Types and quantities of fertilizers in different fertilizer treatments

处理 Treatments	尿素 Urea/(g/盆)	磷酸一铵 Monoammonium phosphate/(g/盆)	氯化钾 Potassium chloride/(g/盆)	堆肥 Compost/(g/盆)	稻壳炭 Rice-husk-derived biochar/(g/盆)
CK	—	—	—	—	—
M	—	—	—	60.4	—
F	1.6	1.2	0.8	—	—
MF	0.8	0.6	0.4	30.2	—
RH1MF	0.8	0.6	0.4	30.2	20
RH2MF	0.8	0.6	0.4	30.2	40
RH4MF	0.8	0.6	0.4	30.2	80
RH8MF	0.8	0.6	0.4	30.2	160
RH4M	—	—	—	60.4	80
RH4F	1.6	1.2	0.8	—	80

CK:对照 Control;M:堆肥 Compost;F:氮磷钾肥 NPK fertilizer;MF:堆肥+氮磷钾肥 Compost & NPK fertilizer;RH1MF:1%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 1% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH2MF:2%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 2% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH4MF:4%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 4% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH8MF:8%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 8% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH4M:4%稻壳炭+堆肥 4% Rice-husk-derived biochar & Compost;RH4F:4%稻壳炭+氮磷钾肥 4% Rice-husk-derived biochar & NPK fertilizer

1.3　测定指标与方法

总磷的测定采用碱熔-钼锑抗分光光度法;有效磷测定采用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗分光光度法;有机磷的测定采用灼烧法,即用 1 mol/L 的 H_2SO_4 浸提经 550 ℃高温灼烧的土和未经灼烧的土,振荡过滤后,滴加指示剂并用 5 mol/L 的 NaOH 调节溶液颜色至微黄色,再加入钼锑抗显色剂,摇匀定容后在分光光度计上 700 nm 处比色,最终结果为灼烧后土壤浸出的磷浓度与未灼烧土壤浸出的磷浓度的差值[11];微生物量磷采用氯仿灭菌-$NaHCO_3$ 提取法[12];碱性磷酸酶活性的测定采用磷酸苯二钠比色法[13]。

1.4　数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Excel 12.0 进行统计分析、作图,对数据进行单因素方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　施用生物炭基肥对石灰土中不同形态磷素含量的影响

2.1.1　土壤总磷含量差异

由图 1 可知,不同生物炭基肥处理后石灰土中总磷含量均显著高于 CK($P<0.05$)。总磷含量大小顺序为为:MF>RH8MF>RH4M>RH2MF>RH4MF>RH4F>F>RH1MF>M>CK,分别比 CK 提高 45.0%、44.3%、40.6%、

39.9%、34.8%、32.7%、31.7%、25.3%、20.7%。RH8MF 处理后石灰土中总磷含量显著高于 RH1MF,说明生物炭高施用量处理能显著提高土壤总磷含量。其中,RH4M 和 RH4F 处理较 M、F 处理的总磷含量高。因此,生物炭与堆肥或 NPK 肥混施比单独施用堆肥或 NPK 肥的效果更好。

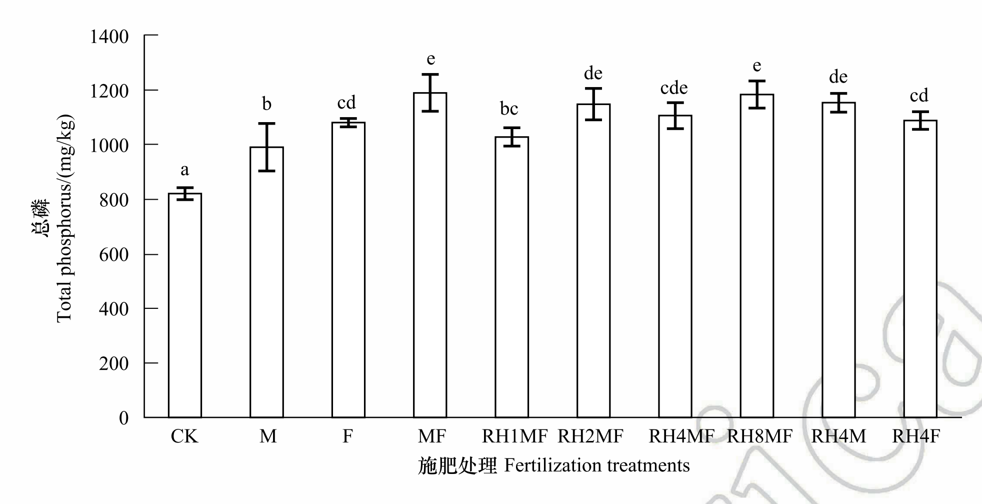


图 1 不同施肥处理方式对石灰土中总磷含量的影响

Fig.1 Effects of different fertilizer treatments on the content of total phosphorus in calcareous soil

CK:对照 Control;M:堆肥 Compost;F:氮磷钾肥 NPK fertilizer;MF:堆肥+氮磷钾肥 Compost & NPK fertilizer;RH1MF:1%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 1% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH2MF:2%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 2% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH4MF:4%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 4% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH8MF:8%稻壳炭+堆肥+氮磷钾肥 8% Rice-husk-derived biochar & Compost & NPK fertilizer;RH4M:4%稻壳炭+堆肥 4% Rice-husk-derived biochar & Compost;RH4F:4%稻壳炭+氮磷钾肥 4% Rice-husk-derived biochar & NPK fertilizer. 不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$)

2.1.2 土壤有效磷含量差异

由图 2 可知,不同生物炭基肥处理后石灰土中有效磷含量明显增加,均达显著水平($P<0.05$)。有效磷含量大小顺序为: RH8MF>RH4MF>RH2MF>RH4M>RH1MF>MF>RH4F>M>F>CK。其中,随着生物炭施用量的增加,石灰土中有效磷含量也随之增加,且增加趋势较明显;RH4MF 处理较 RH4M、RH4F 有效磷含量分别增加 21.9%和 45.8%,且其有效磷含量均高于对照 MF、M、F、CK 处理。由此可见,生物炭+堆肥+NPK 肥混施比单独与堆肥或 NPK 肥施用的效果更好,表明生物炭可促进石灰土中磷的转化,提高有效磷含量。

2.1.3 土壤有机磷含量差异

由图 3 可知,各处理土壤有机磷含量均高于 CK。除 RH4F 和 F 处理外,其他各处理与 CK 相比均达到显著性水平($P<0.05$)。不同处理有机磷含量大小顺序为: RH8MF>M>RH2MF>RH1MF>RH4MF>RH4M>MF>F>RH4F>CK,分别比 CK 提高了 43.6%、27.3%、27.3%、26.2%、25.1%、24.1%、22.2%、14.1%、4.8%。由此可见,RH8MF 处理的土壤有机磷含量增加最多。RH4MF 处理较 RH4M、RH4F 处理有机磷含量高,表明生物炭+堆肥+NPK 肥混施的效果优于生物炭单独与堆肥或 NPK 肥混施处理;M 处理的有机磷含量大于 F 处理,表明堆肥对土壤有机磷的增加作用大于 NPK 肥。

2.1.4 微生物量磷含量差异

由图 4 可知,不同生物炭基肥处理后石灰土中微生物量磷的含量均显著高于 CK($P<0.05$)。微生物量磷含量大小顺序为: RH8MF>RH4MF>RH4M>RH4F>M>RH2MF>F>MF>RH1MF>CK。由此可见,石灰土中微生物量磷含量随着生物炭施用量的增加而增加。另外, RH4MF 处理较 RH4M、RH4F 处理的微生物量磷含量高,表明生物炭+堆肥+NPK 肥混施对微生物量磷含量的提高优于生物炭单独与堆肥或 NPK 肥混施;同时,M 处理效果优于 F 处理,即施用堆肥提高微生物量磷含量的作用优于 NPK 肥。

2.2 施用生物炭基肥处理对石灰土中碱性磷酸酶活性的影响

由图 5 可知,不同生物炭基肥处理后石灰土中碱性磷酸酶活性与 CK 相比均有所提高。除 RH1MF 处理

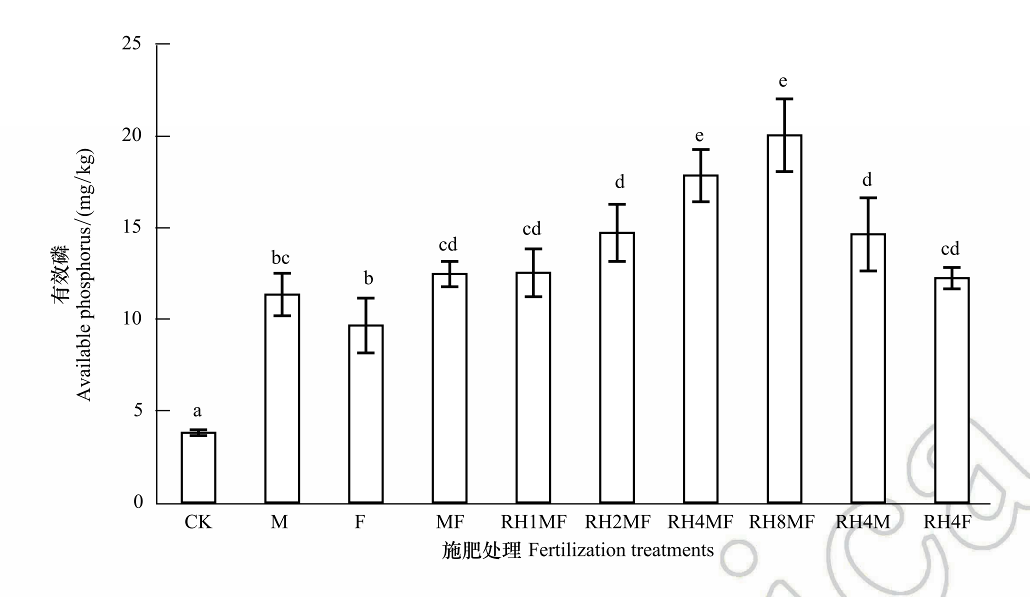


图 2　不同施肥处理方式对石灰土中有效磷含量的影响

Fig.2　Effects of different fertilizer treatments on the content of available phosphorus in calcareous soil

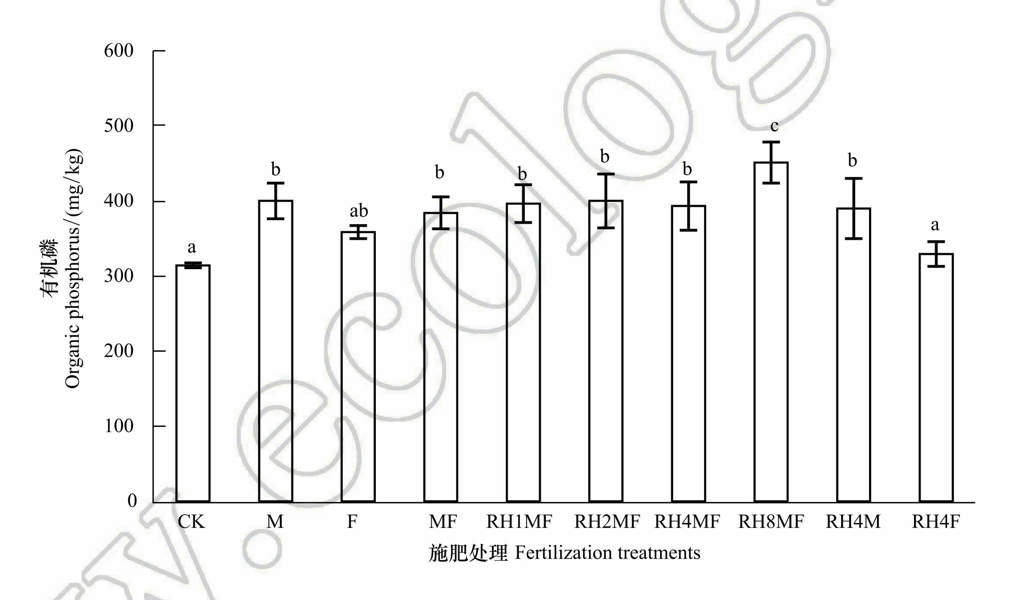


图 3　不同施肥处理方式对石灰土中有机磷含量的影响

Fig.3　Effects of different fertilizer treatments on the content of organic phosphorus in calcareous soil

以外的各处理均达到了显著性差异($P<0.05$)。碱性磷酸酶活性大小顺序为：RH2MF>MF>RH4MF>RH8MF>RH4M>RH4F>M>F>RH1MF>CK。其中,RH2MF、MF、RH4MF 处理分别比 CK 提高了 82.7%、75.3%、63.4%。由此可见,在中等施用量下的生物炭基肥处理(RH2MF 和 RH4MF)对石灰土碱性磷酸酶活性的促进作用较好,高生物炭施用量对石灰土碱性磷酸酶活性会产生抑制作用。RH4MF 处理比 RH4M、RH4F 处理碱性磷酸酶活性高,表明堆肥与 NPK 肥混施比单施堆肥或 NPK 肥对碱性磷酸酶活性的促进作用更好,且堆肥比 NPK 肥的作用更明显。

2.3　施用生物炭基肥处理对刺槐幼苗生物量的影响

由表 3 可知,不同施肥处理后刺槐幼苗生物量与 CK 相比均有所提高,且各处理之间地上生物量和总生物量均达到了显著性差异($P<0.05$)。其中,RH4M 处理刺槐幼苗地上、地下生物量及总生物量达到最大值,分别比 CK 高 275.2%、139.8%、204.8%。由此可见,生物炭与堆肥混施对刺槐幼苗生物量的增加效应最好。另外,随着

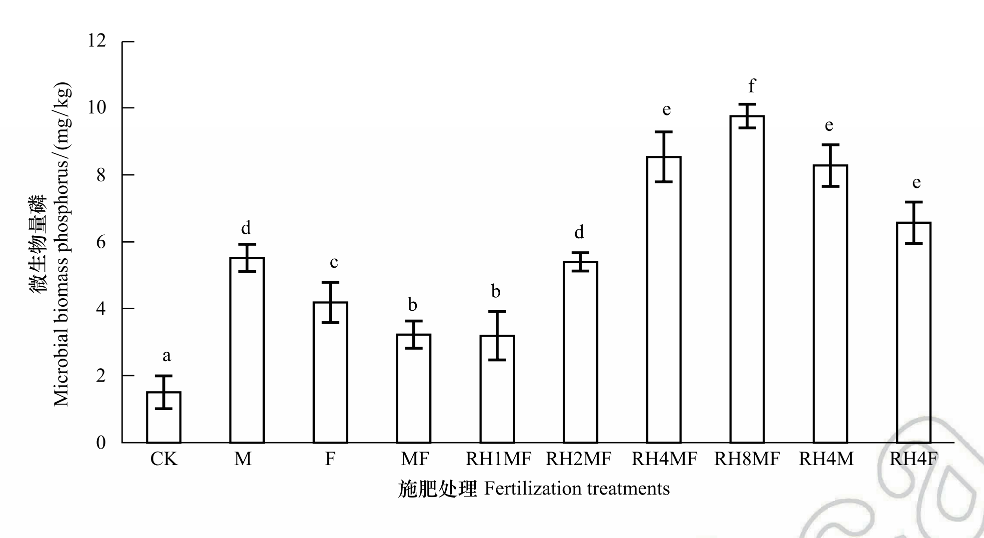


图 4 不同施肥处理方式对石灰土中微生物量磷含量的影响

Fig.4 Effects of different fertilizer treatments on the content of microbial biomass phosphorus in calcareous soil

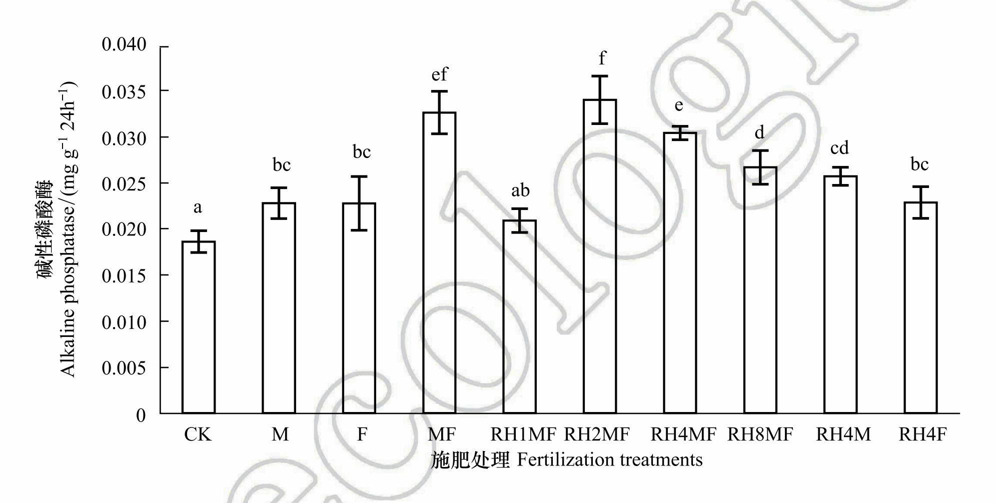


图 5 不同施肥处理方式对石灰土中碱性磷酸酶活性的影响

Fig.5 Effects of different fertilizer treatments on the activity of alkaline phosphatase in calcareous soil

生物炭施用量的增加,刺槐幼苗生物量也随之增加,说明生物炭高施用量下对植物生长的促进作用较好。

表 3 不同施肥处理对刺槐幼苗生物量的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on biomass of black locust seedlings

施肥处理 Fertilization treatments	地上生物量 Aboveground biomass/g	地下生物量 Underground biomass/g	总生物量 Total biomass/g	施肥处理 Fertilization treatments	地上生物量 Aboveground biomass/g	地下生物量 Underground biomass/g	总生物量 Total biomass/g
CK	2.22±0.75a	2.36±0.78	4.59±1.51a	RH2MF	5.78±1.57cd	4.31±2.82	10.09±4.37bcd
M	3.48±1.42ab	2.45±0.79	5.93±2.05abc	RH4MF	5.84±2cd	4.54±2.17	10.38±3.48cd
F	2.87±0.97ab	2.69±2.04	5.56±2.99ab	RH8MF	7.51±1.07de	5.38±0.91	12.89±1.73d
MF	3.6±0.46abc	2.93±0.89	6.53±1.26abc	RH4M	8.33±1.6e	5.66±0.98	13.99±2.58d
RH1MF	3.77±0.79abc	2.5±0.58	6.28±0.76abc	RH4F	4.79±0.43bc	4.96±1.61	9.75±2.02bcd

每列不同小写字母代表显著性差异(P<0.05)

2.4 不同形态磷含量指标的相关性分析

不同形态磷含量指标的相关性分析表明(表 4),总磷与有效磷、有机磷、微生物量磷、碱性磷酸酶之间呈极显著正相关(P<0.01);有效磷与有机磷、微生物量磷、碱性磷酸酶之间呈极显著正相关(P<0.01),其中有效

磷与微生物量磷相关性最强,相关系数为 0.774;有机磷与微生物量磷、碱性磷酸酶之间呈显著正相关(P<0.05);刺槐总生物量与 4 种形态磷含量之间均呈显著正相关(P<0.05)。

表 4　各指标之间的相关性分析表

Table 4　Correlation analysis of each index

项目 Items	有效磷 Available phosphorus	有机磷 Organic phosphorus	微生物量磷 Microbial biomass phosphorus	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	总生物量 Total biomass
总磷 Total phosphorus	0.699 **	0.443 **	0.526 **	0.683 **	0.527 **
有效磷 Available phosphorus		0.730 **	0.774 **	0.573 **	0.775 **
有机磷 Organic phosphorus			0.417 *	0.414 *	0.418 *
微生物量磷 Microbial biomass phosphorus				0.270	0.701 **
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase					0.271

* 表示 P<0.05, * * 表示 P<0.01

3　讨论

磷是植物生长所必需的营养元素之一,土壤中磷含量一般在 0.02%—0.2%之间[14]。本文研究结果表明,生物炭+堆肥+NPK 肥混施制成的生物炭基肥可显著提高喀斯特石灰土中总磷含量。关连珠等研究发现生物炭与化肥配施比单施化肥提高了土壤总磷含量[15],与本文结果趋势一致,这可能是因为生物炭自身含有一定量的磷素,其施用量越高,带入土壤的磷养分含量也越高,从而能显著提高土壤总磷的含量。此外,本文研究结果表明,生物炭高配比施用量下的生物炭基肥处理(RH8MF)可以显著提高土壤有机磷含量。土壤有机磷是总磷的重要组成成分,一般占总磷含量的 20%—80%[16],生物炭、堆肥、化肥作为 N、P 等营养物质的来源施入土壤中,可以增加土壤总磷及有机磷含量。生物炭基肥施加进入土壤,生物炭的多孔性质为土壤微生物提供良好的栖息环境,增加微生物量,增强微生物活性;土壤微生物量磷含量的增加也可作为土壤有机磷的来源之一[17]。本文结果表明,微生物量磷与有效磷之间存在极显著正相关性,解磷微生物可以促进土壤有机磷向有效磷转化,从而增加土壤中有效磷含量。

土壤中能够被植物直接吸收利用的磷为有效磷,占土壤中总磷的一小部分,其含量的大小决定了植物生长的好坏。本文研究结果表明,随着生物炭基肥处理中生物炭施用配比的增加,石灰土中有效磷含量也呈增加趋势,这与他人研究结果一致,即生物炭施用比例越高,土壤中有效磷含量也越高[18]。生物炭具有的吸附作用,可吸附土壤磷素来减少其淋溶损失[19];另一方面,生物炭可通过其自身的阴离子交换作用或者通过影响与磷反应的阳离子来改变磷的有效性,降低土壤对磷的吸附,从而提高土壤磷的有效性,增加土壤有效磷含量[20-21]。同时,生物炭作为一种碳含量较高的有机碳,施入土壤可以矿化自身的有机磷,还可以通过络合溶解、还原等作用活化土壤中难溶解的磷,从而提高磷的有效性[22-29]。本文结果表明 RH4MF 处理土壤有效磷含量高于 RH4M 和 RH4F,说明堆肥+NPK 肥混施比单施效果好,其原因可能是,有机肥中含有的有机磷较为容易分解释放,同时有机肥施加进入土壤后增加的有机离子对土壤磷的专性吸附位点形成屏蔽与竞争,从而增加土壤磷的有效性,增加土壤有效磷含量[30]。土壤中磷含量的增加,直接导致刺槐幼苗生物量的增加,促进了刺槐幼苗的生长,本文研究结果表明,刺槐总生物量与 4 种形态磷元素含量之间呈显著正相关。

土壤磷酸酶是土壤有机磷矿化作用的催化剂,其活性的提高有助于土壤有效磷含量的增加,土壤磷酸酶活性大小能够反映有机磷向有效磷转化的能力。本文研究结果表明,碱性磷酸酶与有效磷之间存在极显著的正相关性,这与其他研究相一致[31]。中等生物炭施用量下的生物炭基肥(RH2MF、RH4MF)处理碱性磷酸酶的活性最高,高施用量生物炭反而抑制了碱性磷酸酶的活性。这可能与土壤的 pH 值有关,研究表明土壤磷酸酶活性受土壤 pH 影响较大[32],由于生物炭自身呈碱性,生物炭高施用量下使土壤 pH 值增大,从而抑制了土壤碱性磷酸酶的活性。

4 结论

生物炭+堆肥+NPK 肥混施制成的生物炭基肥施用可显著提高喀斯特石灰土中总磷、有效磷、有机磷、微生物量磷的含量及刺槐幼苗的生物量，且生物炭高施用量下的生物炭基肥处理效果更好。上述 4 种不同形态的磷含量相互之间呈显著正相关（$P<0.05$），其中有效磷与微生物量磷之间的相关系数最高，达到 0.774，可见喀斯特石灰土中微生物对土壤有效磷含量影响较大。生物炭中等施用量下的生物炭基肥处理（RH2MF 和 RH4MF）对喀斯特石灰土中碱性磷酸酶活性的促进作用最大。综上所述，生物炭高施用量下的生物炭基肥处理可以显著改善喀斯特石灰土中磷素养分状况，促进植物幼苗的生长，可提高喀斯特山地人工幼林地生态恢复的成效。

参考文献（References）：

[1] 李军，吴美玲. 贵州喀斯特地区石漠化形成原因分析. 科协论坛，2013，（7）：127-128.
[2] 王世杰，李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展，2007，22（6）：573-582.
[3] 谢林花，吕家珑，张一平. 长期不同施肥对石灰性土壤微生物磷及磷酸酶的影响. 生态学杂志，2004，23（4）：65-68.
[4] 周炼川，陈效民，李孝良，杨新强，夏雯. 西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤有效磷变异研究. 地球科学与环境学报，2009，31（4）：418-422.
[5] 林治安，赵秉强，袁亮，Hwat B S. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响. 中国农业科学，2009，42（8）：2809-2819.
[6] 李双霖，薛由保. 化肥对土壤养分和酶活性的影响. 福建农业科技，1991，（3）：15-16.
[7] 李瀚. 秸秆、猪粪混施对小麦季土壤养分、酶活性及作物氮磷吸收的影响［D］. 雅安：四川农业大学，2016.
[8] 卜巧珍. 生物炭对石灰土理化性质和作物生长的影响［D］. 桂林：广西师范大学，2014.
[9] 苏倩，侯振安，赵靓，茹思博，翟勇，董天宇. 生物碳对土壤磷素和棉花养分吸收的影响. 植物营养与肥料学报，2014，20（3）：642-650.
[10] 张显松，方升佐，杨德超，吕志英. 喀斯特地区植被恢复模式与应用. 林业科技开发，2008，22（2）：71-74.
[11] 郑必昭. 土壤分析技术指南. 北京：中国农业出版社，2013.
[12] 吴金水，林启美，黄巧云，肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京：气象出版社，2006.
[13] 沈桂琴. 土壤中磷酸酶活性的测定方法. 土壤与肥料，1987，（1）：40-42.
[14] 秦胜金，刘景双，王国平. 影响土壤磷有效性变化作用机理. 土壤通报，2006，37（5）：1012-1016.
[15] 关连珠，禅忠祥，张金海，张广才，张昀. 炭化玉米秸秆对棕壤磷素组分及有效性的影响. 中国农业科学，2013，46（10）：2050-2057.
[16] 石文静. 土壤有机磷的研究进展. 安徽农业科学，2014，42（33）：11697-11701，11703-11703.
[17] Brookes P C，Powlson D S，Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry，1984，16（2）：169-175.
[18] 李治玲. 生物炭对紫色土和黄壤养分、微生物及酶活性的影响［D］. 重庆：西南大学，2016.
[19] 刘新源. 生物炭与无机有机肥料混合施用对土壤理化特性和烟叶产量品质的影响［D］. 郑州：河南农业大学，2014.
[20] 郎印海，王慧，刘伟. 柚皮生物炭对土壤中磷吸附能力的影响. 中国海洋大学学报，2015，45（4）：78-84.
[21] DeLuca T H，MacKenzie M D，Gundale M J. Biochar effects on soil nutrient transformations//Lehmann J，Joseph S，eds. Biochar for Environmental Management，Science and Technology. London，UK：Earthscan Ltd，2009：251-270.
[22] Drever J I，Stillings L L. The role of organic acids in mineral weathering. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，1997，120（1/3）：167-181.
[23] Feng K，Lu H M，Sheng H J，Wang X L，Mao J. Effect of organic ligands on biological availability of inorganic phosphorus in soils. Pedosphere，2004，14（1）：85-92.
[24] Kpomblekou-A K，Tabatabai M A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailabilty of phosphorus in phosphate rocks added to soils. Agriculture，Ecosystems & Environment，2003，100（2/3）：275-284.
[25] Xu G，Sun J N，Shao H B，Chang S X. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. Ecological Engineering，2014，62：54-60.
[26] Christel W，Bruun S，Magid J，Jensen L S. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment. Bioresource Technology，2014，169：543-551.
[27] Zhang F S，Ma J，Cao Y P. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish（Raghanussatiuvs L.）and rape（Brassica napus L.）plants//Ando T，Fujita K，Mae T，Matsumoto H，Mori S，Sekiya J，eds. Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment. Netherlands：Springer，1997.
[28] Jones D L，Darrah P R. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. Plant and Soil，1994，166（2）：247-257.
[29] 章永松，林咸永，罗安程，苏玲. 有机肥（物）对土壤中磷的活化作用及机理研究 Ⅰ. 有机肥（物）对土壤不同形态无机磷的活化作用. 植物营养与肥料学报，1998，4（2）：145-150.
[30] 李莉. 不同施肥制度土壤肥力特征及其对作物产量和品质的影响［D］. 泰安：山东农业大学，2005.
[31] 王俊华，尹睿，张华勇，林先贵，陈瑞蕊，钦绳武. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响. 生态环境，2007，16（1）：191-196.
[32] Acosta-Martínez V，Cruz L，Sotomayor-Ramírez D，Pérez-Alegría L. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. Applied Soil Ecology，2007，35（1）：35-45.